



## قياس نصف القطر الهيدروليكي لجسم بوليمري مسامي باستعمال قيم النفاذية النوعية والمسامية

فاضل عبد رسن

جامعة بابل / كلية العلوم

Email: fadhil\_rasin@yahoo.com

### الخلاصة

يهدف البحث إلى قياس نصف القطر الهيدروليكي لأقراص مصنعة مستوردة لأجسام بوليمرية مسامية ولمدبين  $(0.8, 1) \mu m$ ، باستعمال قيم النفاذية النوعية والمسامية.

تم تصميم وتنفيذ منظومة لقياس قيم النفاذية النوعية وحجرة الفحص حيث وبعد إجراء فحص النضح والمعايرة لمعدات المنظومة تم قياس معدل الجريان الحجمي لقيم متعددة من قيم فرق الضغط على طرفي النموذج ومن العلاقة البيانية تم حساب الميل، ومن قياس السمك والمساحة الفعلية للنموذج تم حساب النفاذية النوعية، كما تم قياس المسامية الظاهرية للنماذج ومن هذين القيمتين تم قياس نصف القطر الهيدروليكي. إن النتائج التي تم الحصول عليها هي بحدود نسبة خطأ  $(12 - 16)\%$ .

## MEASUREMENT OF HYDRAULIC RADIUS OF POROUS POLYMER MEMBRANE USING SPECIFIC PERMEABILITY AND POROSITY VALUES

Fadhil A. Rasin

Babylon University, College of Science

### ABSTRACT

The study concern with the measurement of hydraulic radius of imported porous polymer disc of known values  $(0.8, 1) \mu m$ , using specific permeability and porosity data.

The study started with the design and built up a permeability unit, with a sample cell specified for this purpose. The followed by leak test and calibration.

Volumetric flow rate as a function of pressure difference, across the sample under test, were measured.

The slope of the measured values  $(Q, \Delta p)$  at the linear limit, was applied to calculate the mean hydraulic radius; with respect to the air viscosity value, width and Area of the sample. The compared data gives a limit of accuracy in the range of  $(12 - 16)\%$ .

### المقدمة

يعتمد معدل الجريان الحجمي خلال أي وسط مسامي ذو سمك  $L$  وبمساحة مقطع  $A$  على خاصيتين أساسيتين، الأولى هي انحدارات الجهد للمائع، والثانية هي المقاومة لجريان ذلك المائع على طول مساره (Woll, 1977).

لقد عرّف المعيار لعوامل المقاومة للأجسام المسامية بالنفاذية، كما عرّفت النفاذية النوعية *intrinsic permeability* (Boucher, 1976) لتكون مقياس للانسياب النسبي الذي يحصل خلال الوسط المسامي الذي يؤدي إلى انتقال المائع تحت انحدار جهد معين. وهذه خاصية للوسط التي تعتمد على شكل وحجم المسامات ولا تعتمد على طبيعة المائع ولا على قوة المجال المؤثر المسببة للحركة.

لقد أجريت دراسات عديدة لمعرفة سلوك الجريان داخل الأوساط المسامية وتأثير شكل وتوزيع وحجم المساحات وسمك الجدار المسامي على خصائص الجريان واستعمالاته ومدياته (Andrade *et al*, 1999; Leitzement, 1986; Bear, 1972; Dullien, 1979).

اهتمت الدراسة ببناء منظومة لقياس النفاذية وكذلك إعداد تصميم وتنفيذ حجرة فحص النموذج المسامي، ومنظومة لقياس المسامية، بهدف قياس نصف القطر الهيدروليكي لجسم بوليمري مسامي على شكل قرص باستعمال قيم النفاذية النوعية والمسامية التي يتم قياسهما.

### الجانب النظري

تعد معادلة دارسي، أساس في فهم معدل الجريان الحجمي للمائع (Q) خلال وسط مسامي ذو سمك L وبمساحة مقطع A، إذ عبّر عنها بالعلاقة (Streeter, 1972)

$$Q = kA \frac{\Delta\phi}{L} \quad (1)$$

إذ أن k تسمى بالتوصيلية الهيدروليكية و  $\Delta\phi$  بالجهد البيزومتري (مجموع الطاقة والضغط لوحده الوزن) وتساوي

$$\Delta\phi = (z + P_i) / \gamma \quad (2)$$

إذ أن  $\gamma = \rho g$ ،  $P_i$ : الضغط الهيدروستاتيكي،  $\rho$ : كثافة المائع، g: التعجيل الأرضي، z: ارتفاع الإسناد عن الأفق للنموذج تحت القياس،  $\frac{\Delta\phi}{L}$ : تمثل الانحدار الهيدروستاتيكي ويرمز له بالرمز "J".

يعرف التدفق النوعي "q" بأنه معدل الجريان الحجمي لوحدة مساحة المقطع العرضي العمودي على اتجاه الجريان للنموذج ويساوي  $\left( q = \frac{Q}{A} \right)$  وبذلك يمكن تمثيل معادلة دارسي بالعلاقة التالية:

$$q = kJ \quad (3)$$

يُحسب معدل سرعة المائع المار في الوسط المسامي (V) (Bear, 1972) من العلاقة:

$$V = \frac{Q}{nA} = \frac{q}{n} \quad (4)$$

إذ n تمثل مسامية الوسط.

لقد حدد تطبيق قانون دارسي عند حدود عدد رينولد "Re". Reynolds No. بين (1 - 10)، إذ يعرف عدد رينولد كما يلي:

$$Re = \frac{qd}{\mu} \quad (5)$$

إذ أن  $\mu$  تمثل لزوجة المائع، d قطر المسامة، q: التدفق النوعي.

ولكون المائع يخضع فروقات ضغط، فقد استبدل مفهوم الانحدار البيزومتري بمفهوم الضغط البيزومتري في معادلة دارسي (Lukasiewicz, Reed, 1988) نحصل على

$$Q = \frac{kA}{L} \Delta p \quad (6)$$

وبقسمة طرفي المعادلة بمعامل اللزوجة للمائع، نحصل على أن معامل النفاذية النوعية للجسم المسامي ( $k_p$ ) يعطى بالعلاقة (7):

$$k_p = \frac{Q \mu L}{A \Delta p} \quad (7)$$

ووفقا لنموذج الأنابيب الشعرية، فإن معادلة بوسيلي لجريان لزج خلال قناة مستقيمة مفردة ذات طول  $L$  ونصف قطر  $r$ ، فإن معادلة بوسيلي تعطي بالعلاقة (8) (Bond, 1967):

$$Q = \pi \frac{\Delta p \times r_c^4}{8 \mu L} \quad (8)$$

إذ أن  $r_c$  يمثل نصف قطر القناة، وبفرض وجود  $N$  من الأنابيب الشعرية في وحدة المساحة فإن المعادلة (8) تصبح:

$$Q = N \pi \frac{r_c^4 \times \Delta p}{8 \mu L} \quad (9)$$

وبما أن المسامية  $n$  تعطي بالعلاقة (10):

$$n = \pi N r_c^4 \quad (10)$$

من مقارنة المعادلة (9, 10) بقانون دارسي، ينتج أن النفاذية النوعية:

$$k_p = \frac{n r_c^2}{8} \quad (11)$$

إن المعادلة (11) تمثل اتجاه الجريان السطحي، ولتمثيله بالجريان الحجمي يكون

$$k_p = \frac{n r_c^2}{24} \quad (12)$$

وبما أن المسامات للنموذج المسامي غير متساوية تصبح العلاقة (12) بالشكل التالي:

$$k_p = \frac{n}{24} \int_0^{\infty} r^2 f(r) dr \quad (13)$$

إذ أن  $f(r)$  هي دالة التوزيع الحجمي المسامي [5].

ولكون المسامات ليست مستقيمة، فقد افترض أن تصاغ العلاقة (13) بالشكل التالي (Lukasiewicz et al., 1988):

$$k_p = n \left\{ \frac{\left( \int_0^{\infty} f(x) \frac{dx}{x^2} \right)^2}{\left( 96 T \int_0^{\infty} f(x) \frac{dx}{x^6} \right)} \right\} \quad (14)$$

إذ أن  $T$  هو عامل التعرجية Tortuosity factor.

وإذا افترض أن الوسط المسامي يتكون من حزمة من القنوات المتوازية، المتعرجة، وغير المتصلة ذات طول مؤثر  $L_e$  فإن معادلة بوسيلي تصبح:

$$v = \frac{m^2 \Delta p}{k' \mu L_e} \quad (15)$$

إذ أن  $k'$ : هو عامل التشكيل shape factor،  $v$ : سرعة المائع في القناة،  $m$ : يمثل نصف قطر المسام الهيدروليكي،  $\mu$  اللزجة المائع.

ووفقا إلى افتراض كارمن، إذ اعتبر أن سرعة المائع في القناة الواحدة تساوي سرعة المائع في الوسط المسامي  $v$  مضروبة بالنسبة بين طول القناة المؤثر  $L_e$  إلى طول الجسم المسامي  $L$  أي أن:

$$v = V \frac{L_e}{n L} \quad (16)$$

وبذلك تصبح العلاقة (15) بالشكل التالي

$$v = n m^2 \frac{\Delta p}{\mu L} \left( \frac{L^2}{L_e^2 k'} \right) \quad (17)$$

يسمى المقدار  $\left( \frac{L_e^2 k'}{L^2} \right)$  بثابت كوزوني Kozeny const ويرمز له  $k'_0$  وتكون أفضل قيمة له هي (5) عند محددات افتراضية أن أنصاف أقطار القنوات الشعرية يمكن وصفها بمفهوم نصف القطر الهيدروليكي، وبالتعويض نحصل على:

$$v = n m^2 \frac{\Delta p}{\mu L} \cdot \frac{1}{k'_0} \quad (18)$$

وبمقارنة المعادلة (18) بقانون دارسي ومعادلة (7) نحصل أن

$$m = \sqrt{\frac{k'_0 k_p}{n}}$$

حيث أن  $n$ : المسامية. وبالتعويض عن قيم  $n$ ،  $k_p$ ،  $k'_0$  أمكن حساب قيم نصف قطر المسام الهيدروليكي.

### تصميم منظومة النفاذية

تم تصميم وتنفيذ منظومة لقياس النفاذية، ووفق المخطط (1) وذلك باستعمال أنابيب نحاسية قطر 4mm وربط بتوصيلات ضغط compression fitting، كما تم تصميم وتنفيذ حامل العينات من مادة البراص، كما في الشكل (2).

كما يبين الشكل (3) صورة فوتوغرافية لمنظومة النفاذية يوضح فيها

تم إجراء فحص النضح باستعمال سائل لزج يوضع على أطراف وفوق التوصيلات ضمن المنظومة بعد أن تمت تغذية المنظومة باستعمال هواء لضغط 4bar وبعد غلق التغذية، إذ تترك المنظومة عند هذا الضغط لمدة (30) دقيقة. أن قيمة انخفاض الضغط تسجل والزمن المستغرق وبحساب حجم المنظومة متمثلة بالأنابيب والتوصيلات وحجرات الأجهزة، يحسب معدل النضح للمنظومة بوحدات  $\frac{m \text{ bar} \cdot L}{s}$ . بعد ذلك تفرغ المنظومة بحدود  $10^{-2} m \text{ bar}$  باستعمال مضخة رحية وتغلق بعد تشغيل لمدة

(2hr) للتخلص من الغازات الممتزة على السطوح الداخلية للأنايب وذلك يساعده استعمال هواء ساخن تتعرض له الأنايب من الخارج خلال فترة التفريغ. تعزل المنظومة عن مصدر التفريغ بواسطة صمام مربوط، ويسجل قيمة ارتفاع الضغط لمدة زمنية (30) دقيقة ويحسب معدل النضح للمنظومة.

أن القيمة المحسوبة كانت بحدود  $10^{-4} \frac{\text{m bar} \cdot \text{L}}{\text{s}}$ ، وإذا ما قورنت مع قيمة معدل الجريان المستعمل في القياس لمدى ولحجم منظومة بحدود 3L ولحدود ضغط (4 – 0.4) bar سيكون قيمة النضح غير مؤثرة على دقة القياسات.

### القياسات والحسابات

تم اعتماد نماذج مسامية ووفق المواصفات في جدول (1):  
تم حساب النفاذية النوعية وذلك من قياس ضغط الغاز الداخل إلى النموذج Up stream pressure ( $p_1$ ) وضغط الغاز الخارج من النموذج Down stream pressure ( $p_2$ ) ومعدل الجريان المسجل من خلال مقياس معدل الجريان الحجمي بوحدة ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )،  
تم حساب قيمة النفاذية النوعية باستعمال العلاقة (7) وبرسم العلاقة بين Q و  $\Delta p$  يكون الميل يساوي  $\frac{Q}{\Delta p}$  تصبح العلاقة:

$$\text{specific permeability} = (\text{slope}) \frac{\mu L}{A}$$

من قيم Q و  $\Delta p$  المقاسة، تم قياس الميل للنموذجين حيث يوضح الشكل (4) والشكل (5) العلاقة البيانية بين معدل الجريان الحجمي  $\left( Q \left( \frac{\text{cm}^3}{\text{s}} \right) \right)$  و  $\Delta p$  (atm).

ومن قيم الميل المحسوبة وسلك النموذج وقطر النموذج الفعلي، تم حساب النفاذية النوعية للنموذجين كما معرفة في جدول (2).  
إذ تم حساب قيم المسامية وفقاً للطريقة المعتمدة بموجب المواصفة (ASTM-C373 (1972) إذ يوزن النموذج ليتم وزن النموذج الجاف  $w_d$  باستعمال ميزان حساس 0.001 mg (نوع sartorius balance) بعد ذلك يغمر النموذج ويسخن لدرجة  $60^\circ\text{C}$  ويترك لمدة 24 ساعة ثم يجفف بالمسح ويوزن ليتم وزن النموذج الرطب  $w_s$ ، بعد ذلك يوزن النموذج وهو مغمور بالماء ليتم وزن النموذج المغمور بالماء ( $w_i$ ). وبذلك تحسب المسامية الظاهرية بموجب العلاقة (21) (Andrews, 1957):

$$\text{Apparent porosity (\%)} = \frac{w_s - w_d}{w_s - w_i} \times 100\% \quad (19)$$

إذ عرضت النتائج في الجدولين أعلاه أيضاً  
إن قيمة الخطأ بين القيمة القياسية المسجلة من قبل الشركة وبين القياس المختبري كانت % (12 – 16) وهذه القيمة مرتبطة بطبيعة الأجهزة التي تم استعمالها ودقتها.

### المصادر

1. Andrade, J.R. and Costa, U.M.S. (1999). "Inertial effects on fluid flow through porous media" The Am. Physical Society; Vol. 82, No. 26.
2. Andrews, S.I. (1957). "ceramic test and calculations". John Wiley & Sons, Inc. London.
3. ASTM part 17, C373 (1972). "Water absorption, Bulk density, Apparent porosity and Apparent specific gravity of fired white ware products.
4. Bear, J. (1972). "Dynamics of fluids in porous media. American Elsevier publishing company, Inc. New York.
5. Bond, R.L. (1967) "Porons carbon solids", Academic press, London and New York, p 159.
6. Boucher, E.A. (1976). "Porous materials : structure, properties and capillary phenomena"; J. Mat. Sci. pp 1743-1750.
7. Dullien, F.A.L. (1979). "Porous media fluid transport and pore structure".
8. Leitzement, M. (1986). "Porosity and permeability of ternary mixture of particle" Powder. Technology. Vol. 41 pp (159-164).
9. Lukasiewicz, S.J. and Reed, J.S. (1988). "Specific permeability of porous compacts as described by a capillary model". J. Am. Ceramic Soc., Vol. 71, No. 11, pp 14-1008.
10. Streeter, L. (1972). "Fluid dynamics" 1<sup>st</sup> edition.

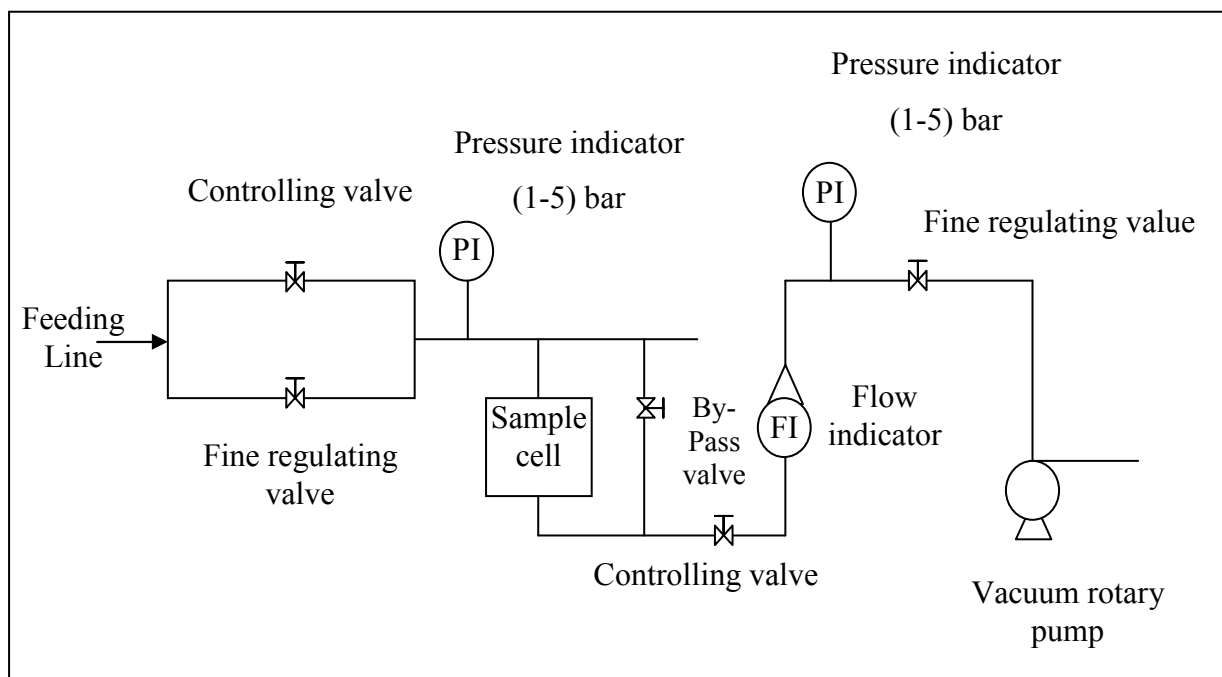
11. Woll, R.G. (1977). "Porosity, permeability, distribution coefficients and dispersivity". Ch: 4; McGraw-Hill book company, Inc. New York and London.

جدول (1): مواصفات النماذج

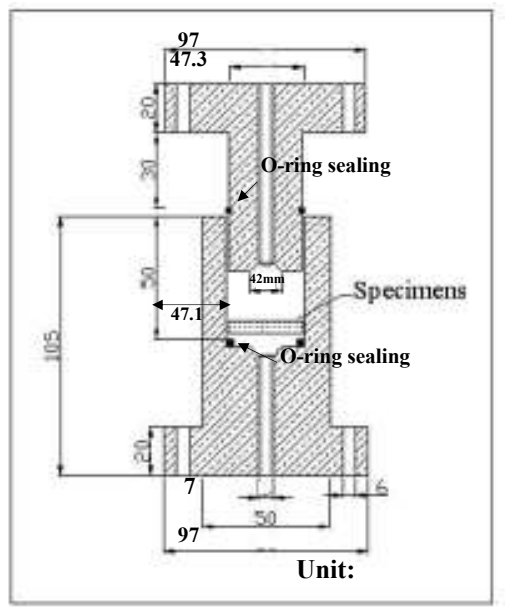
| معدل قطر المسامية المقاس من قبل الشركة المصنعة | قطر النموذج | الشركة المصنعة                                                       |
|------------------------------------------------|-------------|----------------------------------------------------------------------|
| 0.8 $\mu$ m                                    | 47 mm       | Gelman sciences inc. membrane filter<br>PROD 60110 Sup UR – 800      |
| 1.0 $\mu$ m                                    | 47 mm       | Gelman sciences inc. PTFE<br>membrane 60110 Pro D 66155 TF –<br>1000 |

جدول (2): قيم النفاذية النوعية ونصف القطر الهيدروليكي للنماذج

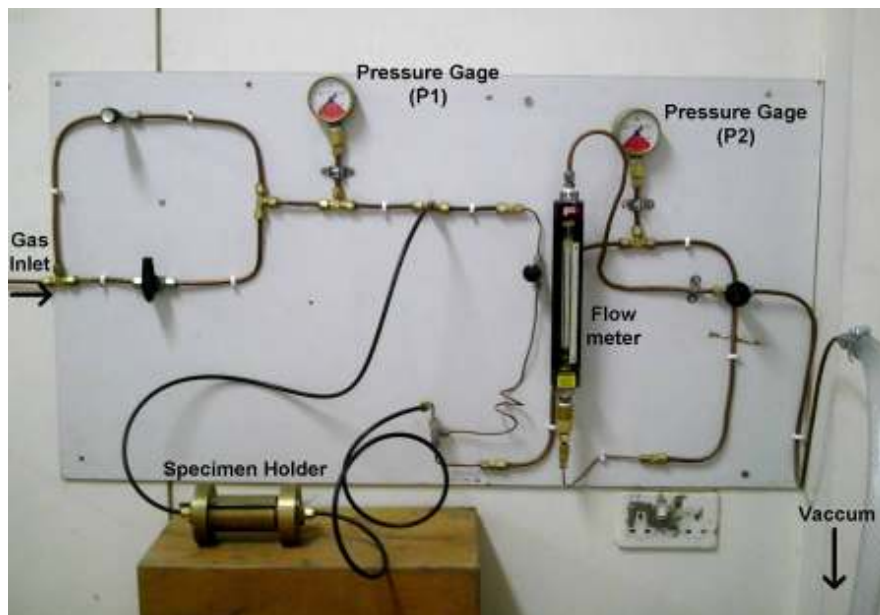
| رقم النموذج | الميل    | النفاذية النوعية<br>$k_p$ (cm <sup>3</sup> ) | المسامية % | نصف القطر الهيدروليكي<br>المقاس ( $\mu$ m) |
|-------------|----------|----------------------------------------------|------------|--------------------------------------------|
| 1           | 1969.386 | 2.23E-08                                     | 19         | 7.13E-05                                   |
| 2           | 2838.622 | 2.22E-08                                     | 23         | 0.856E-05                                  |



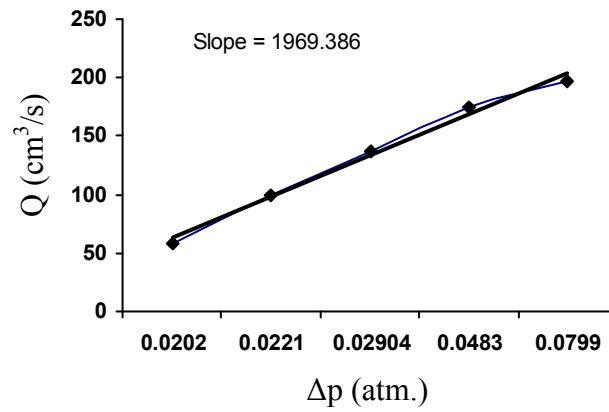
شكل (1) مخطط تتابع العمليات لمنظومة قياس النفاذية



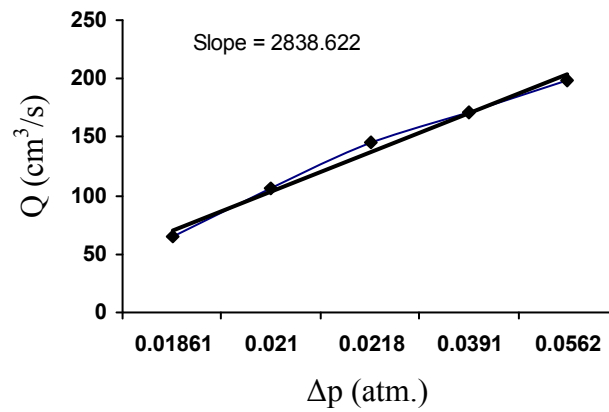
شكل (2) تصميم حجرة الفحص للنماذج



شكل (3) أجزاء المنظومة



شكل (4): تغير معدل الجريان الحجمي مع فرق الضغط عبر النموذج الأول ( $m = 0.8 \mu m$ )



شكل (5): تغير معدل الجريان الحجمي مع فرق الضغط عبر النموذج الثاني ( $m = 1.0 \mu m$ )